

GFRP输电塔T形节点抗弯承载力

陈勇 许金一 谢芳 冯炳 王慧敏 沈国辉

Flexural bearing capacity of T-shaped joints in GFRP transmission towers

CHEN Yong, XU Jinyi, XIE Fang, FENG Bing, WANG Huimin, SHEN Guohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230810.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混合配筋钢纤维增强混凝土梁受弯承载力试验及理论计算

Experimental and theoretical calculation on the flexural capacity of steel fiber reinforced concrete beams with hybrid reinforcing bars

复合材料学报. 2020, 37(9): 2348–2357 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.003>

BFRP筋钢纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论

Experimental and theoretical study on the flexural capacity of high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and steel fiber

复合材料学报. 2018, 35(12): 3313–3323 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.004>

全GFRP筋混凝土电缆排管的抗剪承载力

Shear bearing capacity of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

复合材料学报. 2018, 35(12): 3331–3341 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180206.001>

MT300/KH420碳纤维/聚酰亚胺树脂复合材料层合圆柱壳高温承载性能

Load-bearing capability of laminated MT300/KH420 carbon fiber/polyimide resin composite cylindrical shell at high temperatures

复合材料学报. 2021, 38(7): 2172–2183 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201017.001>

聚丙烯-钢纤维/混凝土柱大偏心受压承载力计算

Calculation of bearing capacity of polypropylene-steel fiber reinforced concrete column under large eccentric loading

复合材料学报. 2020, 37(9): 2336–2347 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200201.001>

弯曲与直锚GFRP复合材料抗浮锚杆锚固特性试验研究

Experimental study on anchoring properties of bended and straight GFRP composite anti-floating anchor

复合材料学报. 2019, 36(5): 1063–1073 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180703.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

GFRP 输电塔 T 形节点抗弯承载力

陈勇¹, 许金一¹, 谢芳^{*2}, 冯炳³, 王慧敏⁴, 沈国辉¹(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 绍兴 312000; 3. 绍兴
大明电力设计院有限公司, 绍兴 312099; 4. 杭州云起商用集团有限公司, 杭州 310007)

分享本文

摘要: 整体成型的玻璃纤维增强复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 节点是 GFRP 输电塔挂线模块的关键结构部件, 需开展其承载力研究。首先对两个典型节点进行了试验研究, 获得了包括荷载位移曲线、破坏模式的力学性能, 然后建立基于渐进损伤演化的有限元模型, 利用该模型开展了抗弯承载力关于垂直纤维方向抗拉强度 Y_t 和剪切强度 S_L 比值、主管直径 D 与厚度 T 比值、节点横梁宽度 B 及厚度 w 等参数的敏感性分析, 基于 Hashin 失效准则和回归分析推演了该节点抗弯承载力算式并进行了可靠度分析。结果表明: 试验和有限元计算结果具有较好的一致性, 主要破坏形式为节点附近 GFRP 主管的基体拉伸破坏, 当 Y_t/S_L 增大时破坏位置从节点向主管中部迁移, 承载力随之下降。承载力算式结果与有限元计算结果比值的均值和变异系数分别为 1.032 和 6.80%, 承载力设计值具有 99.9% 的保证率。

关键词: GFRP 节点; 力学性能; 试验研究; 抗弯承载力; 计算式

中图分类号: TB332; TM753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)05-2609-14

Flexural bearing capacity of T-shaped joints in GFRP transmission towers

CHEN Yong¹, XU Jinyi¹, XIE Fang^{*2}, FENG Bing³, WANG Huimin⁴, SHEN Guohui¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. Shaoxing Daming Electric Power Design Institute CO., LTD., Shaoxing 312099, China; 4. Hangzhou Yunqi Commercial Group CO., LTD., Hangzhou 310007, China)

Abstract: The integrally formed glass fiber reinforced polymer (GFRP) connection is the key structural component of the transmission tower's GFRP line-suspension module, requiring investigation into its capacities. Initially, two typical connections were examined experimentally, yielding mechanical properties including load-displacement curves and failure modes. Subsequently, a finite element model based on progressive damage evolution was established. Using the experimentally validated model, sensitivity analyses on the flexural capacity in relation to parameters such as the ratio of tensile strength Y_t in the direction of the fiber to shear strength S_L , the ratio of main tube diameter D to thickness T , the connection beam width B , and thickness w were conducted. Based on Hashin's failure criterion and regression analysis, an approximating equation for the connection's flexural capacity was derived, followed by a reliability analysis. The results indicate a good consistency between the experimental and the finite element analysis (FEA) results. The primary failure mode is the tension fracture of the matrix of the GFRP main tube near the connection. With increasing Y_t/S_L , the location of failure moves from the connection to the middle of the main tube gradually, showing a corresponding decrease in load-bearing capacity. The mean value and the coefficient of variation of the ratio of approximated capacity to FEA result are 1.032 and 6.80% respectively, and the flexural capacity derived for design has an assurance rate of 99.9%.

收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2023-07-18; 录用日期: 2023-07-20; 网络首发时间: 2023-08-10 16:29:44

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230810.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (51878607; 51838012); 国网浙江省电力公司集体企业科技项目 (SX-JT-KJ-2018-01); 浙江省自然科学基金青年项目 (LQ17 E080010)

National Natural Science Foundation of China (51878607; 51838012); State Grid Zhejiang Electric Power Company Collective Enterprise Science and Technology Project (SX-JT-KJ-2018-01); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LQ17 E080010)

通信作者: 谢芳, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料组合结构、数字化结构设计等 E-mail: xiefangusx@163.com

引用格式: 陈勇, 许金一, 谢芳, 等. GFRP 输电塔 T 形节点抗弯承载力 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2609-2622.

CHEN Yong, XU Jinyi, XIE Fang, et al. Flexural bearing capacity of T-shaped joints in GFRP transmission towers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5): 2609-2622(in Chinese).

Keywords: GFRP connections; mechanical properties; experimental study; flexural capacity; calculation formula

纤维增强复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 具有高强度、轻质量的特征, 在土木工程中应用前景广阔^[1-4]。结合其绝缘性能, FRP 构件, 尤其是玻璃纤维增强复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 构件常被用于电力工程中的输电杆、塔及变电构架等^[4-17], 例如图 1 所示的装配式 GFRP 输电塔^[6], 主要由下部金属塔架与上部装配式 GFRP 挂线模块构成。该塔利用 GFRP 绝缘特性取消挂线横担, 与含挂线横担的传统输电塔结构相比具有窄走廊、绿色节地的优势。连接 GFRP 构件的节点是确保 GFRP 输电塔结构安全的关键部件, 对其开展力学性能研究具有重要意义。

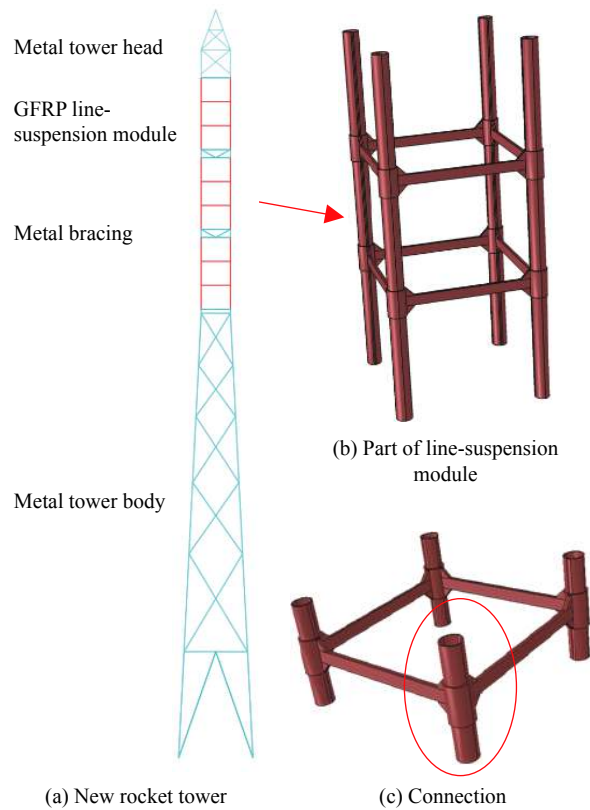


图 1 玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 挂线模块及 T 形节点
Fig. 1 Glass fiber reinforced polymer (GFRP) hanging wire module and T-connection

早期 GFRP 节点主要用于连接土木工程结构中具有工字形和箱形截面的 GFRP 构件, 连接形式主要分为螺栓连接^[18-21] (图 2) 和套管连接等^[22]。工字形截面 GFRP 构件采用螺栓连接的破坏形式包括: (1) 构件腹板和翼缘交界处分离失效; (2) 连接件螺栓连接处拉伸开裂破坏; (3) 连接件三角形腹板横向拉伸失效。箱型截面 GFRP 构件采用

螺栓连接的破坏形式包括: (1) 构件侧板螺栓孔处拉伸破坏; (2) 构件和连接件的局部破坏; (3) 柱构件的侧板与腹板分离等^[18]。另外还有采用胶粘连接代替螺栓连接^[23-26] 及胶粘连接与螺栓连接结合使用 (混合连接)^[27] 的节点形式。欧洲标准化委员会 (Comité Eur-opéen de Normalization, CEN) 在报告中^[28] 指出主要承重部件不应采用胶粘连接, 可采用混合连接或将胶粘连接作为螺栓连接的备用。研究表明, 采用螺栓连接的 GFRP 梁柱节点抗弯能力很少超过被连接构件抗弯能力的 20%^[23], 主要归结于螺栓和构件相接部位的应力集中易导致构件局部破坏。可见, GFRP 螺栓连接节点承载力的不足与节点承载力应大于构件承载力的结构设计原则相悖, 故仍需深入研究。

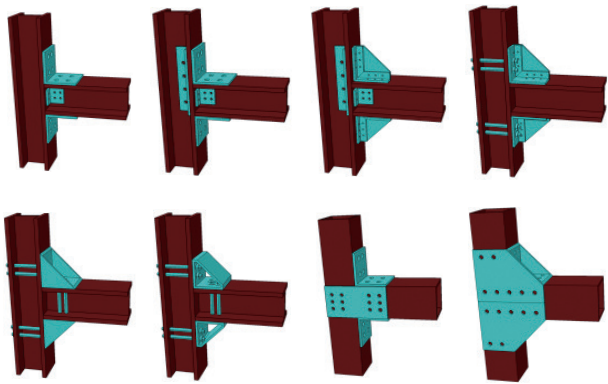


图 2 GFRP 螺栓连接^[18-21]
Fig. 2 GFRP bolted connections^[18-21]

FRP 输电塔结构的主要承重部件 (主材) 通常采用空心圆截面 (Circular hollow section, CHS) 复合材料构件 (CHS-FRP)^[9-13], 螺栓连接形式并不适用, 常用节点形式为金属套管连接形式的节点, 即将 CHS-FRP 构件与金属套管相连接, 金属套管之间采用焊接或螺栓连接^[10-12], 此形式常用于连接 FRP 横担和金属塔架^[9-17]。对 GFRP 输电塔节点力学性能的相关研究主要见于国内报道^[16, 29]。任宗栋等^[12] 对 FRP 输电塔结构节点进行了试验研究, 推荐采用金属法兰套筒用连接塔身, 使用转接法兰加抱箍的方法连接塔身与横担。周磊等^[29] 对采用钢套管进行输电塔 GFRP 构件连接的双 K 形节点进行了足尺试验和有限元分析, 指出该类型节点的薄弱部位为钢套管与 GFRP 构件的连接处。然而, 这些文献均未给出 GFRP 节点承载力计算式, 研究成果难以直接用于工程设计。

快速、机械化、装配式的现代建造要求尽可

能采用模块化结构, 因此图 1 所示输电塔的 GFRP 挂线模块采用了基于整体成型工艺的 GFRP 节点, 本文针对其抗弯承载力开展研究。首先选择了两个典型节点形式进行抗弯力学性能的试验研究, 利用基于渐进损伤演化的 CHS-GFRP 构件建模方法^[6]建立有限元模型, 再利用经试验验证的有限元模型进行了抗弯承载力关于材料强度比、径厚比、节点横梁宽度及厚度等参数的敏感性分析。通过深入分析失效模式, 界定节点破坏的主要参数范围, 并结合 Hashin 失效准则和回归分析推演该节点抗弯承载力的计算式, 最后对该式进行了工程设计可靠度分析。

1 试验概述

1.1 试验节点

GFRP 节点试件的主管采用纤维缠绕工艺制得, 其纤维质量占总质量的 72%, 主管两端有加厚层进行保护。横梁采用先铺层后灌注工艺制得, 使用与 GFRP 圆管试件具有相同的纤维和基体材料。节点主管由内向外按相应顺序铺层, 横梁采用单轴布进行铺层。其中主要原材料有纤维纱、环氧树脂、甲基四氢苯酐、消泡剂、促进剂、增韧剂、多轴布等。

试验制作了 2 个不同尺寸的节点 (J-190-4-400-

75、J-190-4-300-75) 进行抗弯试验。节点尺寸参数如图 3 所示, 图中 d 、 D 、 T 、 L 表示主管的内径、外径、厚度、长度, B 、 w 、 L_1 分别为横梁的宽度、厚度、长度。试件几何尺寸参数取值如表 1 所示。以 J-190-4-400-75 为例, 试件编号的物理意义为 $d=190\text{ mm}$ 、 $T=4\text{ mm}$ 、 $B=400\text{ mm}$ 、 $w=75\text{ mm}$ 的节点。试件端部加厚以防止端部复杂应力状态下的局部破坏。主管按照由内向外 $[0_4]$, 横梁按照 $[0_{162}]$ 进行缠绕铺层。其中 0° 表示铺层的纤维方向与构件 (主管与横梁) 纵轴的夹角为 0° 。

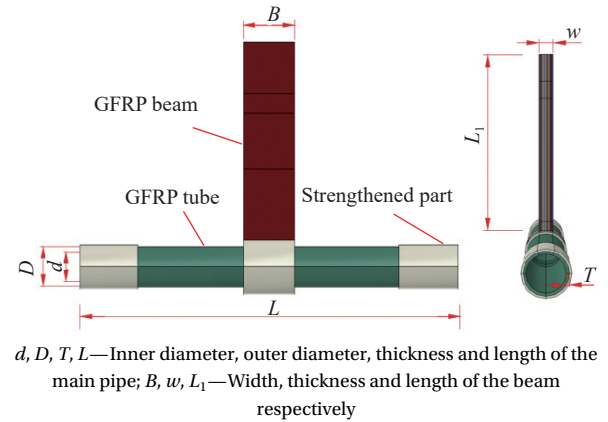


图 3 GFRP 节点构造及几何尺寸参数

Fig. 3 Configuration and geometrical parameters of GFRP connection

表 1 GFRP 节点试件几何尺寸

Table 1 Geometrical parameters of GFRP connection specimens

Specimen number	d/mm	D/mm	T/mm	L/mm	B/mm	w/mm	L_1/mm
J-190-4-400-75	190	198	4	2 200	400	75	1 000
J-190-4-300-75	190	198	4	2 200	300	75	1 000
J-172-14-400-75	172	198	14	2 200	400	75	1 000

1.2 试验装置

试验装置如图 4 所示。试验节点的主管两端由抱箍固定在节点支座上, 左侧端板用斜支架固定, 以限制试件水平移动。试验加载设备为 MTS 电液伺服加载试验系统。通过限位器和加载转换头辅助加载, 限位器限制支杆在加载方向外的变位。加载策略为: 采用位移加载, 加载速度为 0.3 mm/min , 加载位置为距离主管 $L_2=700\text{ mm}$ 处, 当试验荷载值 F 出现下降并小于峰值荷载的 80% 后停止加载。

1.3 测点布置

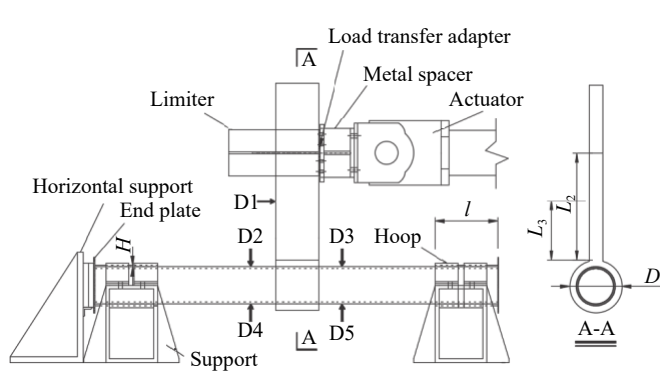
加载试验中主要采集横梁位移 Δ 、主管凹凸程度 (径向变形) δ 及节点转角 φ 等。GFRP 节点试验的位移测点布置如图 4 所示, 分布有 5 个位移

计, D_1 位移计用于测横梁的横向位移 d_1 , $D_2\sim D_5$ 共 4 个位移计用于测量主管管壁向上的位移 $d_2\sim d_5$ 。如图水平向左加载, 则右侧 (加载侧) 主管的无量纲径向变形 $\delta_2=(d_3-d_5)/d_r$, 正值通常为管壁凸起, 左侧主管的无量纲径向变形 $\delta_1=(d_2-d_4)/d_r$, 负值通常为管壁凹陷。节点转角 $\varphi=(d_4-d_5)/(B+40)$, 其中 $d_r=(D+d)/2$ 为中面直径, 正值表示逆时针转动。位移计 $D_2\sim D_5$ 距离横梁根部 20 mm 。 $H=10\text{ mm}$ 为加固层厚度, $L_3=380\text{ mm}$ 为横梁位移测量点距离横梁根部距离, $l=340\text{ mm}$ 为主管端部加厚层长度。

2 有限元数值仿真模拟

2.1 损伤演化模型和失效准则

有限元计算采用 Matzenmiller-Lapczyk 损伤演



(a) Geometrical dimensions and layout of measuring points
D1-D5—Displacement transducers; H —Thickness of strengthen part; l —Length of strengthened part of pipe's end; L_2 —Distance from loading point to top of main pipe; L_3 —Distance from D1 to top of main pipe

图 4 试验装置

Fig. 4 Experimental setup

化模型^[30]及 Hashin 失效准则进行渐进损伤分析^[31-32]。蔡勇等^[33]的研究表明采用该模型和损伤准则可以很好地表征具有复杂应力状态的空心圆截面 GFRP 构件的力学性能。

根据 Hashin 失效准则^[31-32]，主要的失效模式分为 4 种，即

(1) 纤维压缩失效：

$$\left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1, \quad \hat{\sigma}_{11} < 0 \tag{1}$$

(2) 纤维拉伸失效：

$$\left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1, \quad \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \tag{2}$$

(3) 基体拉伸失效：

$$\left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1, \quad \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \tag{3}$$

(4) 基体压缩失效：

$$\left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S_t}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_t}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S_t}\right)^2 \geq 1, \quad \hat{\sigma}_{22} < 0 \tag{4}$$

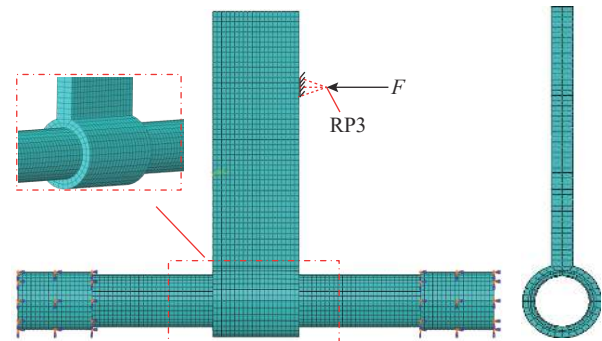
式中： X_t 为纤维方向受拉强度； X_c 为纤维方向受压强度； Y_t 为基体方向受拉强度； Y_c 为基体方向受压强度； S_L 为纵向剪切强度； S_t 为横向剪切强度； α 表示剪应力对失效影响程度的参数； $\hat{\sigma}_{11}$ 、 $\hat{\sigma}_{22}$ 、 $\hat{\tau}_{12}$ 分别为有效应力张量的分量。下标数字表示了应力方向，其中 1 方向为纤维方向，2 方向为垂直于纤维方向，3 方向为铺层堆叠方向。

2.2 有限元模型

采用 ABAQUS 有限元通用分析软件，对两个

GFRP 节点试件进行建模。

单元类型采用 SC8R 连续壳单元，网格尺寸约为 30 mm。约束方式与试验一致，即主管两端在加厚层外表面采用固定约束，如图 5 所示。加载面位于横梁上，耦合其面上所有节点于参考点 RP3，参考点施加水平位移荷载。采用 ABAQUS 中的 Explicit 求解器进行准静态计算。计算中不进行质量缩放，荷载幅值曲线采用平滑分析步，且时间步为 0.3 s，为各个试件的加载方向 1 阶周期的 10 倍以上。计算结果表明，各试件损伤前一刻的动能与内能之比小于 0.005，满足准静态特征要求。材料力学参数如表 2 所示，表中除 Y_t 外其他参数和文献^[33]相同。Matzenmiller 损伤演化模型中完全失效时等效位移需根据材料断裂韧性计算，表 2 给出了材料的断裂韧性 $G_{c,i}$ (i =ft, fc, mt, mc) 值，其中下标 ft、fc、mt 和 mc 分别表示纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸和基体压缩。



RP3—Reference point; F —Load

图 5 网格划分和约束

Fig. 5 Meshing and constraints

表 2 GFRP 力学参数^[33]

Table 2 Mechanical parameters of GFRP ^[33]	
Parameters	Value
E_{1c}/MPa	49 760
E_{2c}/MPa	12 970
ν_{21c}	0.28
G_{12}/MPa	3 220
G_{13}/MPa	3 220
G_{23}/MPa	3 220
X_t/MPa	964.25
Y_t/MPa	53.12
X_c/MPa	617.16
Y_c/MPa	103.83
S_L/MPa	34.71
S_t/MPa	34.71
$G_{c,ft}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	45
$G_{c,fc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	40
$G_{c,mt}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.165
$G_{c,mc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.800

Notes: E_{1c} , E_{2c} —Young’s modulus in the direction parallel and perpendicular to fiber respectively, while under compression; ν_{21c} —Poisson’s ratio while under the compression in the direction parallel to fiber; G —Shear modulus with subscripts 1, 2 and 3 defining the directions parallel to fiber, perpendicular to fiber, and the direction perpendicular to the plane by directions 1 and 2; X_t , X_c —Tension and compression strength respectively in the direction parallel to fiber; Y_t , Y_c —Tension and compression strength in the direction perpendicular to fiber; S_t , S_L —Shear strength in the lateral and longitudinal directions respectively; G_c —Fracture toughness with subscripts ft, fc, mt and mc defining fiber in tension, fiber in compression, matrix in tension and matrix in compression respectively.

3 结果与分析

3.1 GFRP 输电塔 T 形节点荷载-位移曲线

图 6 绘制了位移-荷载曲线, 总体上位移随荷载增加而线性增加, 在达到极限荷载后, 试件主管出现局部破坏, 刚度突然下降, 随后停止加载。可见, 有限元结果与两个试件的试验结果较吻合。两试件试验的极限荷载 F_u 分别为 70 kN 和 79 kN, 有限元计算值为 69.81 kN 和 78.70 kN, 误差不到 1%。两试件试验得到极限位移分别为 11.59 mm 和 13.00 mm, 有限元计算值为 10.56 mm 和 13.40 mm, 误差为 8.89% 和 3.07%。分析表明有限元模型可以准确反映 GFRP 节点的刚度与强度。位移-荷载曲线表明 GFRP 节点的破坏属于脆性破坏。

为进一步表征试件在加载过程中的变形情况, 图 7 给出了两个试件的 φ 和 δ 随弯矩 M 变化的曲线, 其中 $M=FL_2$ 为极限荷载对应的节点处弯矩。 $M-\varphi$ 和 $M-\delta$ 曲线均基本为线性。由图可见有限元计算结果和试验结果接近, 表明有限元模型可以准确反映 GFRP 节点的变形特征。

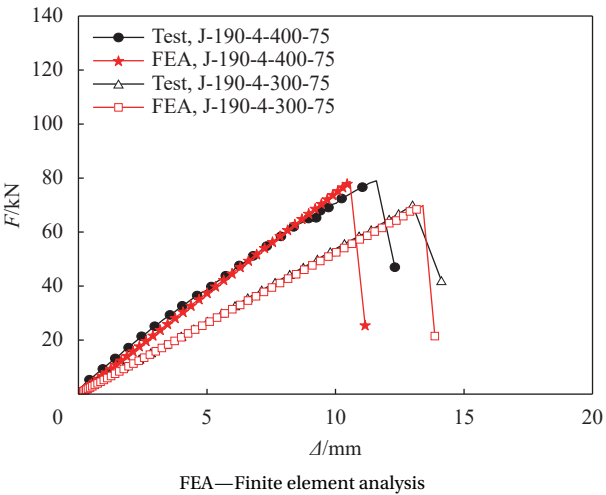


图 6 GFRP 输电塔 T 形节点试件的位移 (Δ)-荷载 (F) 曲线
Fig. 6 Displacement (Δ)-load (F) curves of specimens of T-shaped GFRP transmission tower joint

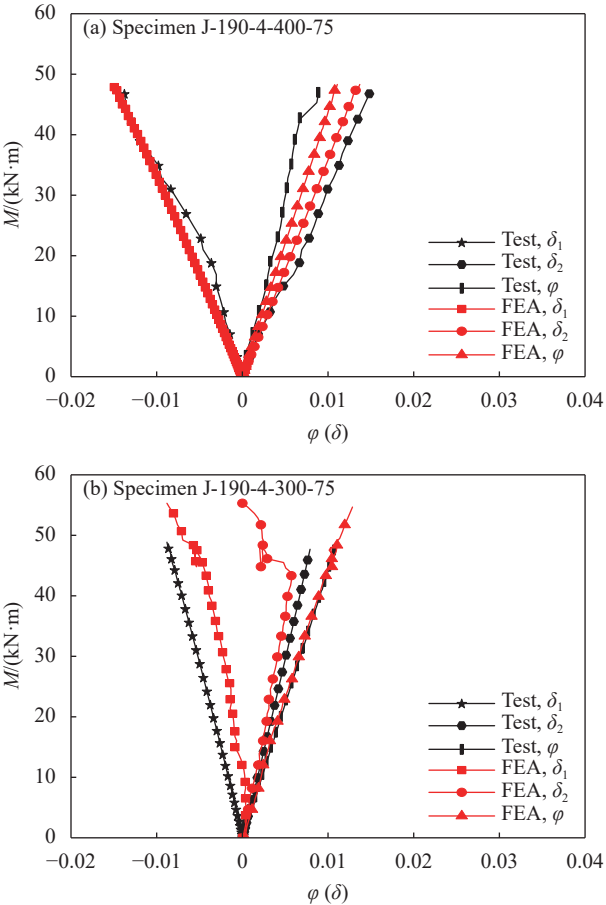


图 7 GFRP 输电塔 T 形节点试件的弯矩 (M)-转角 (φ) 和 M -径向变形 (δ) 曲线
Fig. 7 Bending moment (M)-rotational angle (φ) and M -radial deformation (δ) curves of T-shaped GFRP transmission tower joint specimens

3.2 GFRP 输电塔 T 形节点破坏形式

试验中间歇出现响声, 表明主管与横梁内部

的纤维在加载中出现了早期断裂。节点最终破坏形态为主管出现凹陷，纵向开裂破坏，同时横梁出现横向与竖向裂缝，主管另一侧未见明显破坏。图 8(a) 给出了 J-190-4-300-75 试件主管破坏形式，即主管一侧出现了明显的纵向开裂、凹陷及纵向纤维断折；图 8(b) 给出了 J-190-4-400-75 试件主管的破坏形式，同样表现为主管一侧出现了局部凹陷，纵向纤维断折。

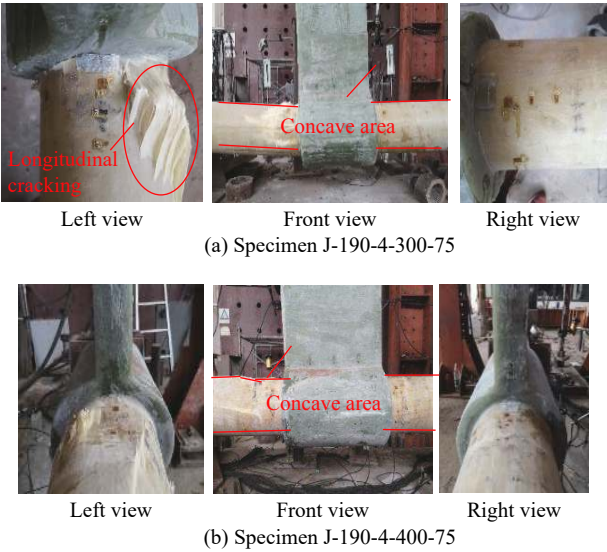


图 8 GFRP 输电塔 T 形节点试件的破坏模式

Fig. 8 Failure modes of specimens of T-shaped GFRP transmission tower joint

图 9 给出了有限元计算获得的极限荷载 (69.81 kN、78.70 kN) 下两个试件基体拉伸损伤分布云图，其数值代表了损伤程度，数值为 1.0 时表明完全损伤。可见，试件主管靠近节点部位的损伤程度较大，与试验观测到的节点破坏现象一致。进一步地，图 10 给出了有限元计算的两试件在破坏时的 Mises 应力云图及变形图。应力云图表明节点附近的主管出现了应力峰值，是节点破坏主要原因。此外，有限元计算获得的变形形态与试验节点破坏时的变形形态较相似，进一步表明了有限元计算的可靠性。

3.3 GFRP 输电塔 T 形节点失效区域及应力特征

图 11 以 J-190-4-400-75 为例显示了极限荷载 (78.70 kN) 下 GFRP 节点基体和纤维在有限元模型中的材料失效区域分布，图中 FC、FT、MC、MT 分别表示纤维压缩、纤维拉伸、基体压缩和基体拉伸。可见，失效区域主要分布于节点附近的主管，该处失效区域的面积相对较大，为节点破坏的初始位置。有限元分析结果与节点试验所发现

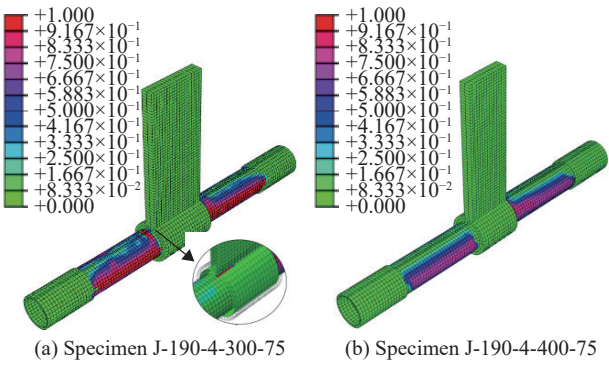


图 9 GFRP 输电塔 T 形节点试件的基体拉伸损伤

Fig. 9 Matrix-tension damage of specimens of T-shaped GFRP transmission tower joint

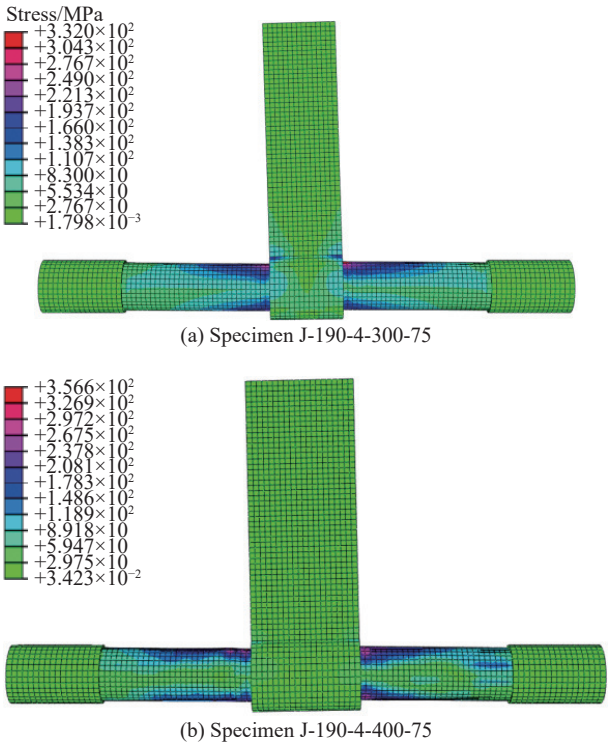


图 10 破坏荷载下 GFRP 输电塔 T 形节点 Von Mises 应力图

Fig. 10 Von Mises's stress contour maps of specimens of T-shaped GFRP transmission tower joint under failure load

的节点附近主管首先出现环向基体拉伸破坏相一致。

图 12 给出了试件 J-190-4-400-75 在极限荷载 (78.70 kN) 下的应力云图，图中 S_{11} 、 S_{22} 分别表示沿主管的纵向和环向的应力， S_{12} 表示剪切方向应力。可见，节点附近的主管纵向应力明显大于环向应力，剪切应力相对较小。

4 参数敏感性分析

4.1 材料参数的敏感性分析

鉴于 GFRP 材料的各向异性特征，开展了承载力关于各材料强度参数的敏感性分析，主要包

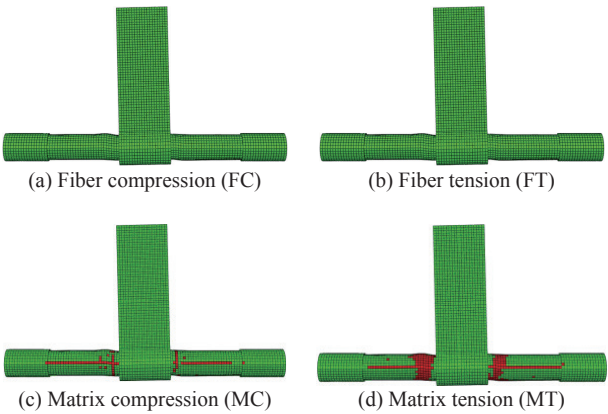


图 11 极限荷载下 GFRP 输电塔 T 形节点试件 J-190-4-400-75 的失效区域

Fig. 11 Failure region of specimen J-190-4-400-75 of T-shaped GFRP transmission tower joint under ultimate load

括 X_t 、 Y_t 、 X_c 、 Y_c 、 S_L 、 S_t 及材料强度比 Y_t/S_L 这 7 个参数。这里以试件 J-190-4-400-75 为基准试件, 即其参数 (表 2) 为基准参数, 变化某一参数时, 其他参数仍取基准参数。表 3 给出了参数变化取值情况。

从工程设计的角度, 由于该 GFRP 节点往往表现为脆性破坏, 因此峰值荷载 F_u 不宜作为结构的设计承载力。基于允许应力法设计思想, 可出现初次材料损伤破坏时的损伤荷载 F_s 表征其承载力。由于本文节点形式大多表现为基体拉伸破坏, 因此定义损伤荷载为出现基体拉伸破坏时的荷载, 并作为节点承载力分析依据。图 13 给出了损伤荷载随各参数变化的曲线。可见, X_t 、 X_c 、 Y_c 、 S_t 的变化对损伤荷载的影响较小。 Y_t 和 S_L 的增加将使损伤荷载增加, 并且当 Y_t 和 S_L 增加到一个较大值时, 损伤荷载趋于定值。这也与试验中的节点附近主管环向基体拉伸失效一致。

为进一步分析 Y_t 和 S_L 对损伤荷载的影响, 分别以两种具有不同径厚比的节点 J-190-4-400-75 和节点 J-172-14-400-75 为基准试件, 对表 4 中 Y_t 和 S_L 值的 25 种材料强度组合进行了分析, 25 个工况下的 Y_t/S_L 变化范围为 0.6 到 7。两个节点的其他材料参数按表 2 选取。节点 J-190-4-400-75 的几何尺寸参数见表 1。节点 J-172-14-400-75 的主管壁厚 14 mm, 外径为 200 mm, 其他几何参数和试

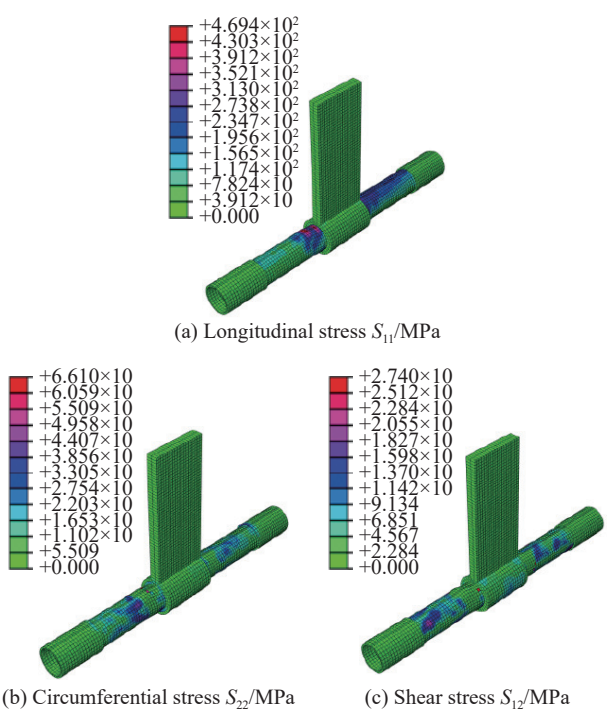


图 12 极限荷载下 GFRP 输电塔 T 形节点试件 J-190-4-400-75 的应力分布

Fig. 12 Stress contour maps of specimen J-190-4-400-75 of T-shaped GFRP transmission tower joint under ultimate load

件 J-190-4-400-75 参数相同。

定义无量纲弯矩 $\tilde{M}_s$ 为

$$\tilde{M}_s = \frac{M_s}{Y_t T^2 B} \tag{5}$$

式中, $M_s = F_s L_2$ 为损伤荷载对应的节点处弯矩。图 14 给出了 $\tilde{M}_s$ 与 Y_t/S_L 的变化关系。结果显示, 随着 Y_t/S_L 的增大, $\tilde{M}_s$ 先保持不变, 达到临界值后再下降。分析表明, 当 Y_t/S_L 较小时, 节点破坏形式主要为节点附近主管的环向基体拉伸破坏, 因此 $\tilde{M}_s$ 保持不变。当 Y_t/S_L 增大, 此时节点主要破坏区域逐渐从节点区域向主管中部迁移, 仍表现为环向的基体拉伸破坏, $\tilde{M}_s$ 相应减少。图 15 给出了 Y_t/S_L 较小和较大时对应的两种破坏形式。

4.2 几何参数的敏感性分析

破坏位置位于主管中部的情况可归结为主管构件的破坏, 该位置主管承受弯剪组合荷载作用。可见, 弯剪组合荷载下的主管构件承载力和 Y_t/S_L 值密切相关。为聚焦于节点承载力, 需排除可能

表 3 GFRP 输电塔 T 形节点参数敏感性分析采用的材料参数

Table 3 Material parameters used for parametric sensitivity analysis of T-shaped GFRP transmission tower joints					
X_t /MPa	Y_t /MPa	X_c /MPa	Y_c /MPa	S_t /MPa	S_L /MPa
650, 750, 850, 964.25,	30, 40, 50, 53.12,	300, 400, 500, 617.16,	60, 70, 80, 103.83,	20, 25, 30, 34.71,	10, 20, 26, 34.71,
1 050, 1 150, 1 250	60, 70, 100	700, 800, 900	120, 140, 160	40, 45, 50	45, 53, 63

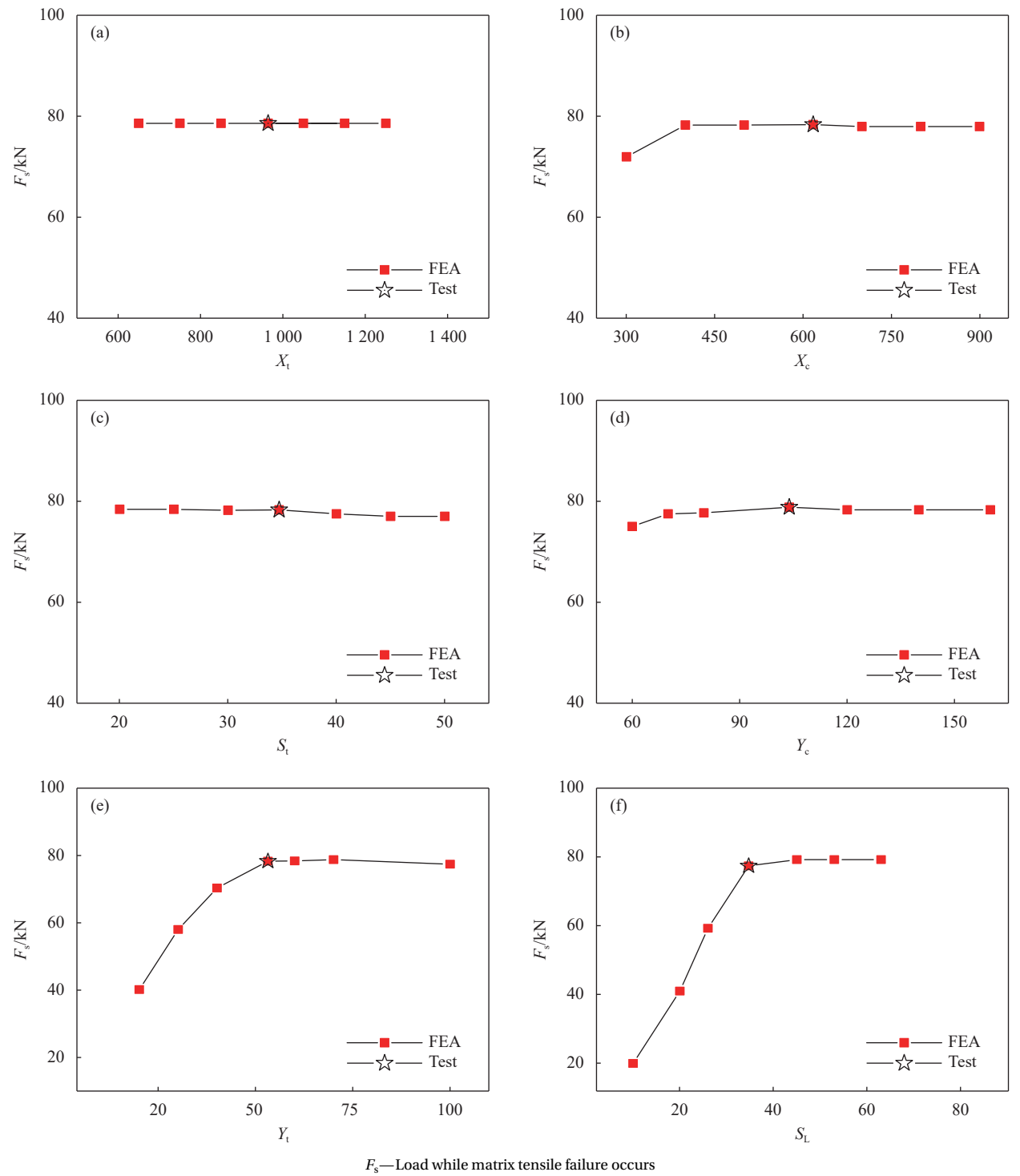


图 13 GFRP 输电塔 T 形节点承载力随材料参数变化

Fig. 13 Variation of capacity of T-shaped GFRP transmission tower joint with material parameters

表 4 试件 J-190-4-400-75 与试件 J-172-14-400-75 的材料强度比取值
Table 4 Material strength ratios for specimen J-190-4-400-75 and specimen J-172-14-400-75

Y_t	S_L
30, 40, 53, 60, 70	10, 20, 34, 40, 50

出现的主管构件破坏模式。表 5 给出了 75 个节点模型的几何参数。对于这些节点。预计算分析表明，当 Y_t/S_L 落在 0.6~1.5 范围内时，损伤荷载为定值且破坏发生于节点附近主管。因此，下文涉及的各节点 Y_t/S_L 取值 1.0， $Y_t=53.12$ MPa。

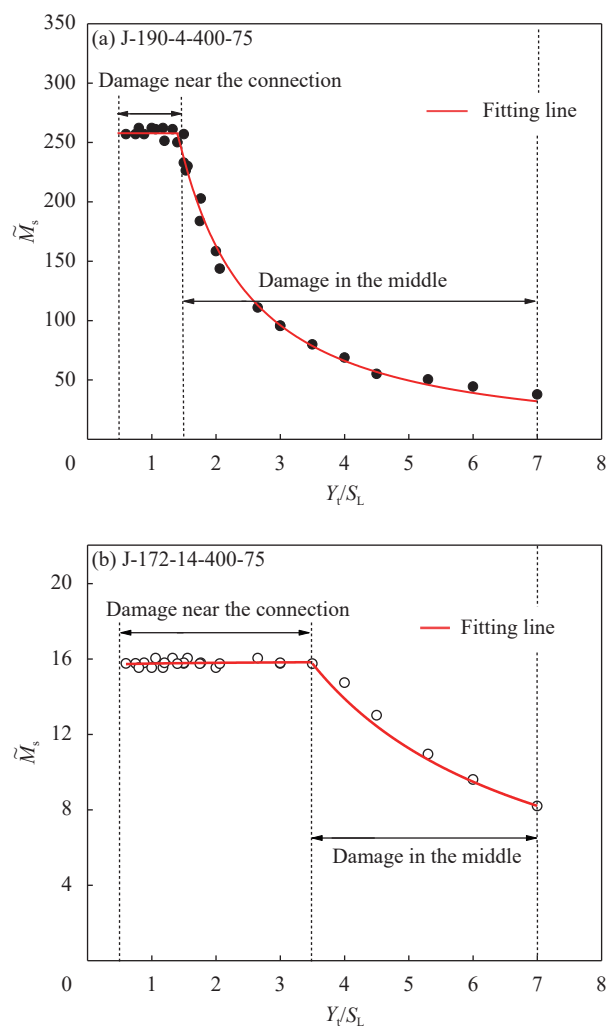


图 14 GFRP 输电塔 T 形节点的无量纲弯矩 $\tilde{M}_s$ 随基体拉伸强度 Y_t 和纵向剪切强度 S_L 之比变化

Fig. 14 Variation of nondimensional bending moment $\tilde{M}_s$ of T-shaped GFRP transmission tower joint with the ratio of tension strength of matrix Y_t to longitudinal strength S_L

为深入研究节点抗弯承载力，将荷载设为在 L_2 高度处的横梁截面施加均布弯矩，同时在主管两端设置刚性域，一端的刚性域中心约束 3 个平动方向位移，另一端的刚性域中心仅约束竖向和横向的位移，即采用简单支撑。为避免横梁破坏，横梁的材料强度值设为表 2 中各强度乘以 10。

图 16 给出了 M_s 与径厚比相关参数 $\gamma=0.5D/T$ 的关系，可见当 B 和 w 不变时，节点损伤荷载 M_s 随着 γ 的增大几乎不变，说明节点处主管破坏时的 M_s 与 γ 基本无关。

表 5 用于参数敏感性分析的 GFRP 输电塔 T 形节点的几何参数

Table 5 Geometry parameters for parametric sensitivity analysis of T-shaped GFRP transmission tower joint

D/mm	T/mm	B/mm	w/mm
200	14, 7, 4	200, 250, 300, 350, 400	40, 50, 60, 70, 76

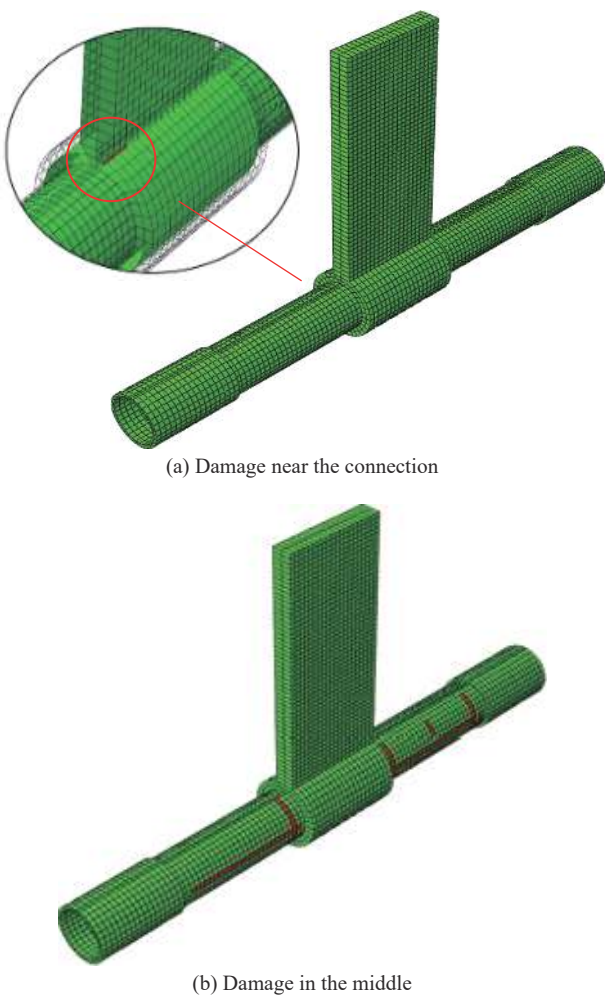


图 15 GFRP 输电塔 T 形节点的两初始损伤模式

Fig. 15 Two initial damage modes of T-shaped GFRP transmission tower joint

图 17 给出了不同径厚比下 $\tilde{M}_s$ 随 w/D 变化的情况。可见 $\tilde{M}_s$ 随着 w/D 的增大而增大。 B/D 越大，则 $\tilde{M}_s$ 对 w/D 越敏感。图 18 给出了不同径厚比下 $\tilde{M}_s$ 随 B/D 变化的情况。可见 $\tilde{M}_s$ 随着 B/D 的增大而增大。 w/D 越大，则 $\tilde{M}_s$ 对 B/D 越敏感，即增长更快。

5 GFRP 节点承载力计算

5.1 承载力计算公式

采用损伤弯曲荷载作为 GFRP 节点抗弯承载力。由前述可知， Y_t/S_L 较小时发生了节点处主管破坏且承载力与 Y_t/S_L 无关，并且应力分析也表明该处的剪切应力相对于环向基体拉伸应力较小，因此实际破坏主要由基体拉伸强度 Y_t 控制，则节

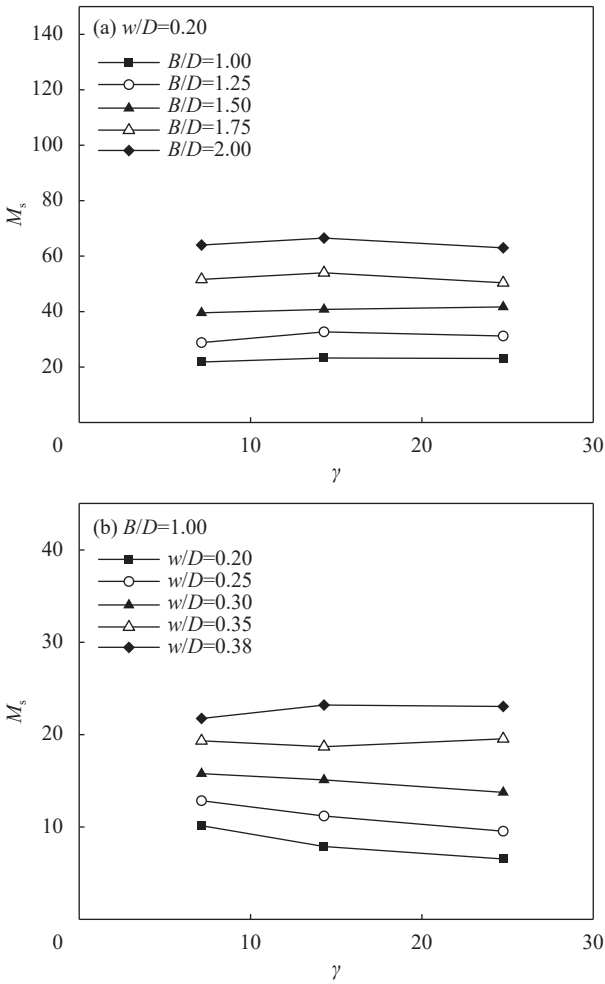


图 16 GFRP 输电塔 T 形节点的弯矩 M_s 随直径厚比相关参数 γ 变化
Fig. 16 Bending moment M_s of T-shaped GFRP transmission tower joint varies with the diameter to thickness ratio-related parameter γ

点承载力可表示为

$$\frac{M_s}{T^2 B Y_t} = \kappa \tag{6}$$

式中, κ 为关于 B/D 、 γ 、 w/D 的函数。通过对参数敏感性回归分析, 可得 κ 的经验计算式为

$$\kappa = 0.75 \frac{w}{D} \left(\frac{w}{D} \gamma^{2.155} + 0.66 \frac{B}{D} \gamma^{1.573} \right) \tag{7}$$

则

$$M_s = 0.75 \frac{w}{D} \left(\frac{w}{D} \gamma^{2.155} + 0.66 \frac{B}{D} \gamma^{1.573} \right) T^2 B Y_t \tag{8}$$

根据参数敏感性分析结果, 该式的适用范围为 $0.2 \leq w/D \leq 0.38$ 、 $1.0 \leq B/D \leq 2.0$ 、 $7.14 \leq \gamma \leq 2.0$ 和 $0.6 \leq Y_t/S_L \leq 1.5$ 。

图 19 给出了表 6 中节点根据式 (8) 计算结果 $M_{s,Th}$ 和有限元结果 $M_{s,FEA}$ 的比较。图中横坐标为公式计算结果, 纵坐标为有限元计算结果。式 (8) 与有限元计算结果比值的均值为 1.032, 变异

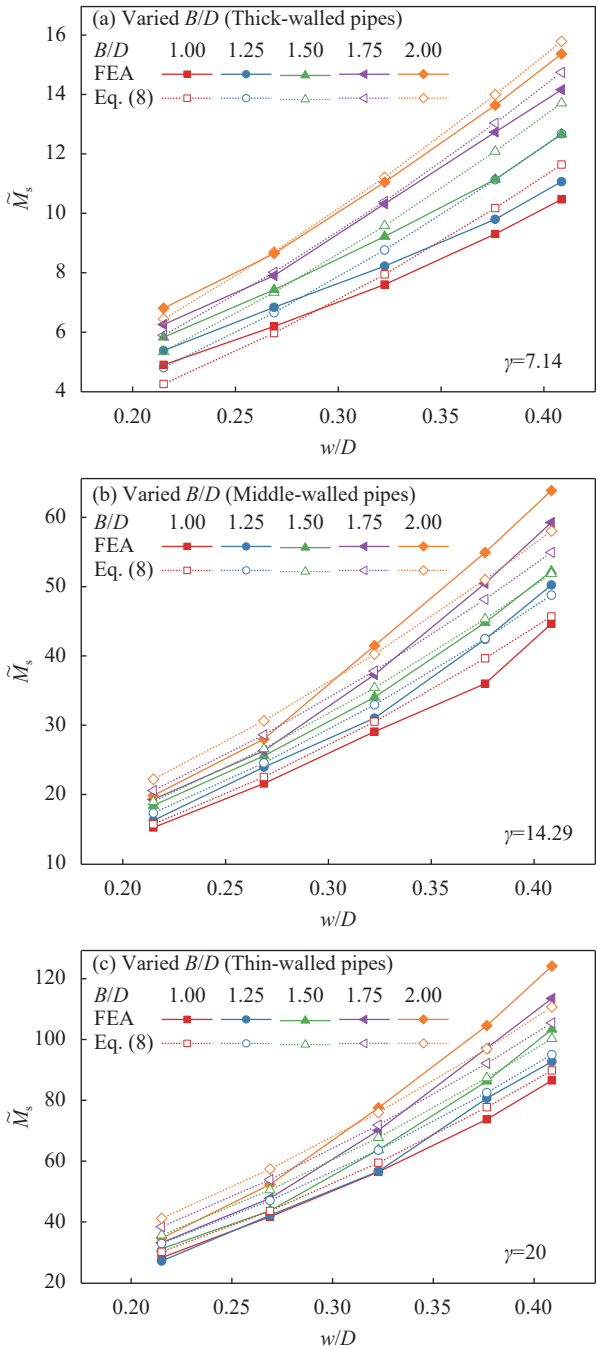
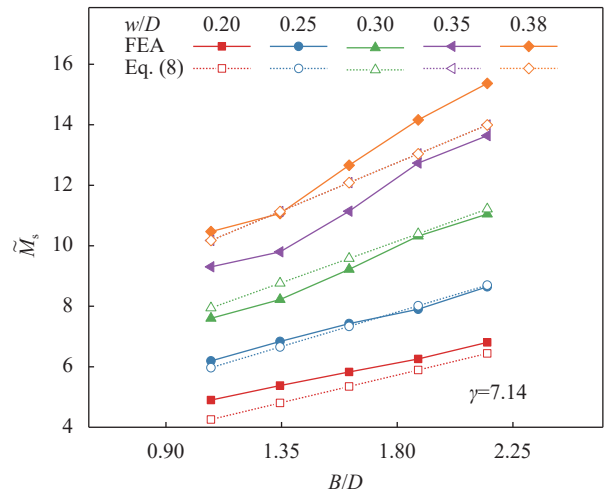


图 17 GFRP 输电塔 T 形节点的 $\tilde{M}_s$ 随 w/D 的变化
Fig. 17 Variation of $\tilde{M}_s$ of T-shaped GFRP transmission tower joint with w/D

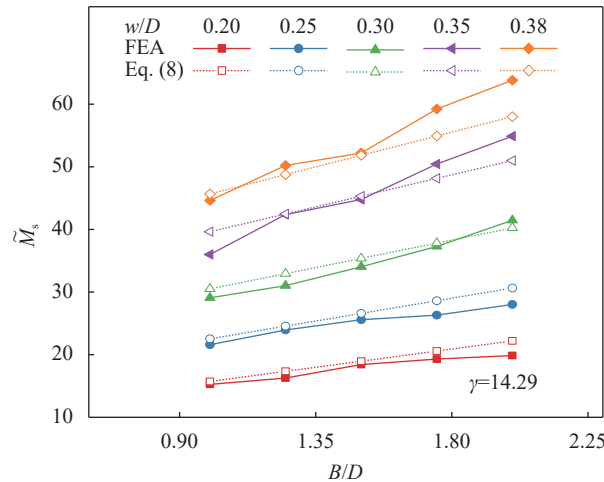
系数为 6.80%。此外, 在图 17 和图 18 中也给出了式 (8) 计算结果, 该值和有限元结果相比无论是数值还是变化趋势均较接近, 表明式 (8) 可以较好地估算节点抗弯承载力。

5.2 可靠度分析

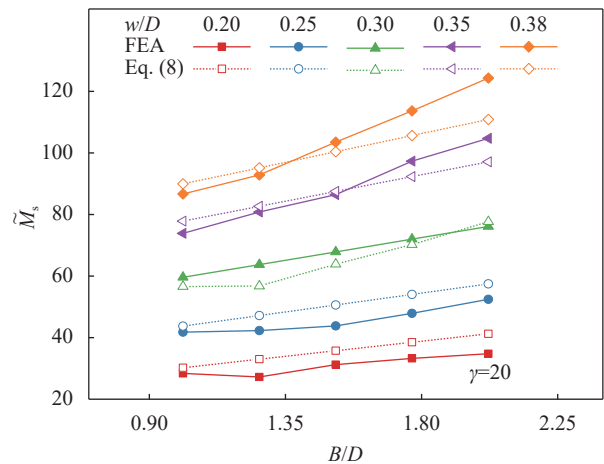
为得到设计承载力 M_d , 首先根据欧洲规范 [34] 可靠度分析理论建立了可靠度分析模型如下:



(a) Varied w/D (Thick-walled pipes)



(b) Varied w/D (Middle-walled pipes)



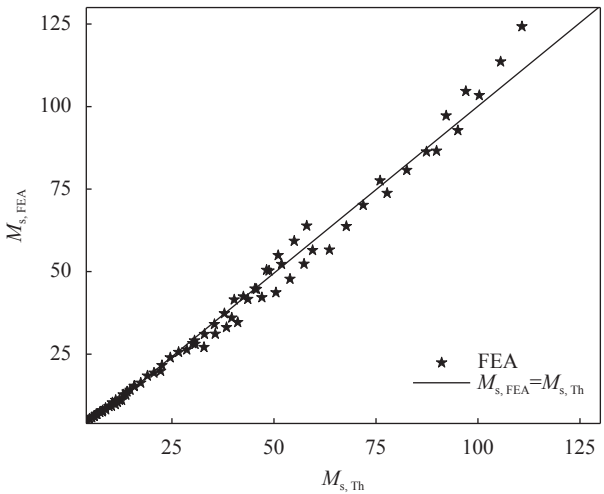
(c) Varied w/D (Thin-walled pipes)

图 18 GFRP 输电塔 T 形节点的 $\tilde{M}_s$ 随 B/D 的变化

Fig. 18 Variation of $\tilde{M}_s$ of T-shaped GFRP transmission tower joint with B/D

$\chi = \xi \chi_T \tau$ (9)

式中： χ_T 表示理论值； τ 和 ξ 分别表示误差项和



$M_{s,FEA}$ —Capacity via FEA; $M_{s,Th}$ —Capacity via Equation (8)

图 19 理论计算和 FEA 得到的 GFRP 输电塔 T 形节点承载力

Fig. 19 Capacities of T-shaped GFRP transmission tower joint via theoretical and FEA approaches

表 6 可靠度分析相关参数

Table 6 Parameters related to reliability analysis

$k_{d,n}$	$k_{d,\infty}$	ξ	V_τ	η
3.0400	3.0400	0.9996	0.0712	0.7323

Notes: $k_{d,n}$, $k_{d,\infty}$ —Coefficients related to reliability; ξ —Correction factor; V_τ —Coefficient of variation (COV) of error term τ ; η —Reduction factor.

基于最小二乘法的修正系数，计算方法为

$$\xi = \frac{\sum \chi_{E,i} \chi_{T,i}}{\sum \chi_{T,i}^2}$$
 (10)

$$\tau_i = \frac{\chi_{E,i}}{(\xi \chi_{T,i})}$$
 (11)

式中， $\chi_{E,i}$ 和 $\chi_{T,i}$ 分别表示第 i 个节点的仿真计算结果和第 i 个节点的理论计算结果。

由此，基于可靠度分析的抗弯承载力设计值 M_d 计算式为

$$M_d = \eta M_s$$
 (12)

式中，折减系数 η 在样本量小于 100 时的计算式为

$$\eta = \xi \exp(-k_{d,\infty} \alpha_{RT} Q_{RT} - k_{d,n} \alpha_\tau Q_\tau - 0.5 Q_R^2)$$
 (13)

式中： Q 为对数正态分布随机变量取对数后的均方差； α 为权重系数； Q 、 α 及下文中变异系数 V 的下标 RT、R 和 τ 分别表示抗力理论值、抗力和误差； $k_{d,\infty}$ 和 $k_{d,n}$ 为系数且均取 3.04 以使式 (12) 计算的设计值具有 99.9% 的保证率。 Q 和 α 的计算式为

$$Q_{RT} = \sqrt{\ln(V_{RT}^2 + 1)}$$
 (14)

$$Q_{\tau} = \sqrt{\ln(V_{\tau}^2 + 1)} \quad (15)$$

$$Q_R = \sqrt{\ln(V_R^2 + 1)} \quad (16)$$

$$\alpha_{RT} = \frac{Q_{RT}}{Q_R}, \quad \alpha_{\tau} = \frac{Q_{\tau}}{Q_R} \quad (17)$$

式中, V_{τ} 为 τ 的变异系数, 根据欧洲规范, V_{RT} 未知时可取与 V_{τ} 相同的值。同时, 对于数值较小的变异系数 V_{τ} 与 V_{RT} , V_R 可计算为

$$V_R = \sqrt{V_{\tau}^2 + V_{RT}^2} \quad (18)$$

由前得到可靠度分析的各个参数如表 6 所示, 故抗弯承载力设计值 M_d 为

$$M_d = 0.549 \frac{w}{D} \left(\frac{w}{D} \gamma^{2.155} + 0.66 \frac{B}{D} \gamma^{1.573} \right) T^2 B Y_t \quad (19)$$

图 20 给出了有限元计算结果和式 (19) 计算结果的比较, 可见两者比值均超过 1.0。

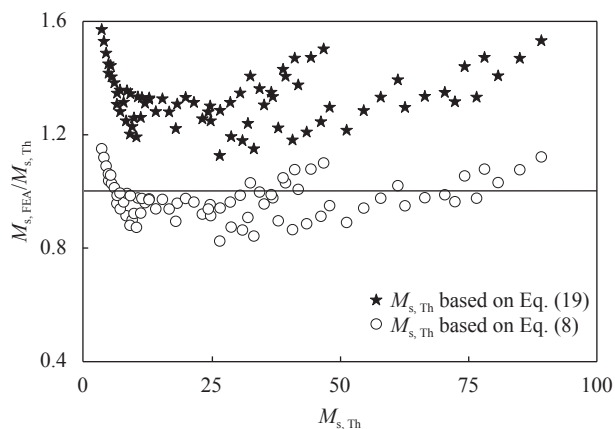


图 20 GFRP 输电塔 T 形节点的设计值和 FEA 结果

Fig. 20 Values of design capacity of T-shaped GFRP transmission tower joint and FEA results

6 结论

(1) 试验结果表明, 该玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 整体成型 T 形节点的主要破坏形式为主管环向基体拉伸破坏, 破坏类型为脆性破坏, 破坏形态为主管表面的局部凹陷。试验结果和基于复合材料单元的有限元计算结果一致, 表明该数值仿真计算可较好地反映 GFRP 圆管和节点的力学性能。

(2) 材料参数的敏感性研究表明, 节点承载力和垂直纤维方向基体抗拉强度 Y_t 及剪切强度 S_L 较相关。对试验试件的计算表明, Y_t/S_L 小于临界值时节点承载力保持不变且节点破坏模式为节点附近主管的环向基体拉伸破坏, Y_t/S_L 超过该临界值

时, 节点承载力随着 Y_t/S_L 的增大而减少, 节点破坏位置逐渐偏离节点中心, 破坏形式主要为主管自身受到弯剪组合荷载后破坏。

(3) 通过对 75 个具有不同 B/D 、 $D/2T$ 和 w/D 参数的节点进行基于仿真计算的抗弯承载力几何参数敏感性分析 (其中 B 、 w 、 D 和 T 分别表示横梁宽度、横梁厚度、主管外径和主管厚度)。计算中令 $Y_t/S_L=1$ 以排除掉主管构件自身的破坏。计算结果表明 B/D 、 w/D 是影响节点抗弯承载力的主要几何参数。

(4) 提出的抗弯承载力计算式与有限元计算结果相比无论是数值还是变化趋势均较接近, 两者之比的均值和变异系数分别为 1.032 和 6.80%, 表明该式可以较好地估算节点抗弯承载力。根据欧洲规范可靠度分析理论获得的设计承载力具有 99.9% 的保证率。

参考文献:

- [1] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2): 73-87.
- [2] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(12): 1-11.
TENG Jinguang. New-material hybrid structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(12): 1-11(in Chinese).
- [3] 刘承斌, 应健, 陈勇, 等. 全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(1): 70-80.
LIU Chengbin, YING Jian, CHEN Yong, et al. Experimental study on flexural performance of concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer bars[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(1): 70-80(in Chinese).
- [4] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3): 24-36(in Chinese).
- [5] GODAT A, LÉGERON F, GAGNÉ V, et al. Use of FRP pultruded members for electricity transmission towers[J]. *Composite Structures*, 2013, 105: 408-421.
- [6] 柳欢欢, 刘明慧, 于鑫. 复合材料输电杆塔设计方法讨论[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(6): 48-52.
LIU Huanhuan, LIU Minghui, YU Xin. The discussion of designing fiber reinforce plastic transmission tower[J].

- Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(6): 48-52(in Chinese).
- [7] 王力, 罗正帮, 杨雪锋. 复合材料输电杆塔设计及其发展的制约因素[J]. 工程与建设, 2014, 28(4): 504-505, 562.
- WANG Li, LUO Zhengbang, YANG Xuefeng. Constraints on the design of composite power transmission towers and their development[J]. Engineering and Construction, 2014, 28(4): 504-505, 562(in Chinese).
- [8] 崔旭, 冯炳, 陈勇, 等. 基于多尺度建模的GFRP输电塔数值仿真[J]. 空间结构, 2022, 28(4): 87-96, 15.
- CUI Xu, FENG Bing, CHEN Yong, et al. Numerical simulation of GFRP transmission tower based on multi-scale modeling[J]. Spatial Structures, 2022, 28(4): 87-96, 15(in Chinese).
- [9] ADISHCHEV V V, ZUBKOV A S, IVANOV A I, et al. Rational design of steel-GFRP towers for ultracompact overhead power lines[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(3): 189-195.
- [10] 赵胜利, 曾健, 苏耀国, 等. 复合材料输电杆塔结构受力分析[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 23-29.
- ZHAO Shengli, ZENG Jian, SU Yaoguo, et al. Force analysis of the composite material transmission tower structure[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(2): 23-29(in Chinese).
- [11] 马辉, 刘云贺, 郭宏超, 等. 双向荷载作用下 FRP 复合材料横担体系受力性能试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 164-170.
- MA Hui, LIU Yunhe, GUO Hongchao, et al. Experimental research on mechanical properties of cross arm system using FRP composite material under two-way loads[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 164-170(in Chinese).
- [12] 任宗栋, 刘泉, 默增禄. 纤维增强复合材料输电杆塔节点设计及优化[J]. 电力建设, 2011, 32(4): 87-91.
- REN Zongdong, LIU Quan, MO Zenglu. Joint design and optimization of FRB tower[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(4): 87-91(in Chinese).
- [13] 吴雄, 蔡伟, 李健, 等. 电力纤维增强复合材料应用进展[J]. 复合材料科学与工程, 2021(11): 116-128.
- WU Xiong, CAI Wei, LI Jian, et al. Application progress of power fiber reinforced composite materials[J]. Composites Science and Engineering, 2021(11): 116-128(in Chinese).
- [14] ASYRAF M R M, ISHAK M R, SAPUAN S M, et al. Utilization of bracing arms as additional reinforcement in pultruded glass fiber-reinforced polymer composite cross-arms: Creep experimental and numerical analyses[J]. *Polymers*, 2021, 13(4): 620.
- SYAMSIR A, EAN L W, ASYRAF M R M, et al. Recent advances of GFRP composite cross arms in energy transmission tower: A short review on design improvements and mechanical properties[J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2778.
- [16] 何昌林, 沈帆, 柯锐, 等. 复合绝缘横担在110 kV输电线路改造工程中的应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 157-163.
- HE Changlin, SHEN Fan, KE Rui, et al. Application of composite insulated crossarm in the reconstruction project of 110 kV transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 157-163(in Chinese).
- [17] 李健, 吕健双, 柯嘉, 等. 500 kV同塔双回复合横担杆塔研究[J]. 电力勘测设计, 2023(2): 57-61, 88.
- LI Jian, LYU Jianshuang, KE Jia, et al. Research on composite-cross-arm tower of 500 kV double circuit transmission line[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(2): 57-61, 88(in Chinese).
- [18] BANK L C, MOSALLAM A S, MCCOY G T. Design and performance of connections for pultruded frame structures[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1994, 13(3): 199-212.
- [19] MOSALLAM A S, ABDELHAMID M K, CONWAY J H. Performance of pultruded FRP connections under static and dynamic loads[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1994, 13(5): 386-407.
- [20] SMITH S J, PARSONS I D, HJELMSTAD K D. An experimental study of the behavior of connections for pultruded GFRP I-beams and rectangular tubes[J]. *Composite Structures*, 1998, 42(3): 281-290.
- [21] SMITH S J, PARSONS I D, HJELMSTAD K D. Experimental comparisons of connections for GFRP pultruded frames[J]. *Journal of Composites for Construction*, 1999, 3(1): 20-26.
- [22] MARTINS D, PROENÇA M, ALMEIDA GONILHA J, et al. Experimental and numerical analysis of GFRP frame structures. Part 1: Cyclic behaviour at the connection level[J]. *Composite Structures*, 2019, 220: 304-317.
- [23] ASCIONE F, LAMBERTI M, RAZAQPUR A G, et al. Strength and stiffness of adhesively bonded GFRP beam-column moment resisting connections[J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 1248-1257.
- [24] RAZAQPUR A G, ASCIONE F, LAMBERTI M, et al. GFRP hollow column to built-up beam adhesive connection: Mechanical behaviour under quasi-static, cyclic and fatigue loading[J]. *Composite Structures*, 2019, 224: 111069.
- [25] ASCIONE F, LAMBERTI M, RAZAQPUR A G, et al. Pseudo-ductile failure of adhesively joined GFRP beam-column connections: An experimental and numerical investigation[J]. *Composite Structures*, 2018, 200: 864-873.
- [26] ASCIONE F, GRANATA L. Mechanical models for predict-

ing the strength and stiffness of a beam-to-column adhesively-bonded connection between pultruded profiles[J]. Structures, 2022, 43: 493-507.

[27] FENG P, WU Y, DING Y W, et al. Quasi-plastic flexural behavior of adhesive-bolt hybrid connection for large scale pultruded GFRP frame[J]. Engineering Structures, 2021, 238: 112200.

[28] ASCIONE L, CARON J F, GODONOU P, et al. Prospect for new guidance in the design of FRP: EUR 27666 EN [R]. Ispra: European Commission's Joint Research Centre, 2016.

[29] 周磊, 汪楚清, 孙清, 等. 玻璃纤维增强复合材料输电塔节点承载力试验研究及有限元分析[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9): 112-118.

ZHOU Lei, WANG Chuqing, SUN Qing, et al. Experimental study and finite element analysis on ultimate bearing capacity of joint of glass fiber reinforced polymer for transmission tower[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9): 112-118(in Chinese).

[30] PINHO S T, DARVIZEH R, ROBINSON P, et al. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(19-20): 2313-2341.

[31] HASHIN Z, ROTEM A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials[J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7(4): 448-464.

[32] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 329-334.

[33] 蔡勇, 冯炳, 陈勇, 等. 基于渐进损伤模型的缠绕玻璃纤维增强复材圆管轴压性能仿真[J]. 工业建筑, 2021, 51(7): 194-202.

CAI Yong, FENG Bing, CHEN Yong, et al. Numerical simulations of axial compressive properties for gfrp pipes by the filament winding method based on the progressive damage model[J]. Industrial Construction, 2021, 51(7): 194-202(in Chinese).

[34] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode-basis of structural design: EN 1990: 2002 + A1: 2005 E[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.